Ленинградское отделение
Общества по распространению политических и научных знании РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ДОМ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОПАГАНДЫ

В В ПАСЫНКОВ, Ю. Т. ОКУНЕВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ (ВАРИСТОРЫ)

Выпуск 11

Ленинград
1963

Настоящая серия «Полупроводники», издаваемая Ленинградским Домом научно-технической пропаганды и Институтом полупроводников Академии наук СССР, предназначается для инженерно-технических работников, в той или иной степени соприкасающихся в своей повседневной работе с полупроводниковыми приборами и материалами. Предпринятое третье по счету издание цикла монографий по полупроводникам служит дополнением к предыдущим сериям, изданным ЛДНТП в 1956—1957 гг.

Редколлегия просит все замечания и пожелания направлять по адресу: **Ленинград, Д-11, Невский проспект, 58 Ленинградский Дом научно-технической пропаганды.**

РЕДКОЛЛЕГИЯ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Нелинейными сопротивлениями называются сопротивления, у которых вольтамперная характеристика отличается от прямой линии. Пример одной из таких кривых, снятых при постоянном напряжении с переменой полярности или при переменном напряжении, показан на рис. 1. Как видно из рисунка, это сопротивление при постоянном напряжении или при переменном напряжении данной частоты является активным.

Различают нелинейные сопротивления, меняющие значение своего сопротивления под влиянием нагрева, и сопротивления, уменьшающие свою величину при увеличении напряженности электрического поля. Первые получили название термисторов, или термосопротивлений (ТС), вторые — варисторов или нелинейных полупроводниковых сопротивлений (НПС).

Нелинейные сопротивления могут быть двух видов: симметричные и несимметричные. К симметричным относятся сопротивления, обладающие одинаковыми ветвями вольтамперной характеристики при перемене полярности приложенного напряжения (рис. 1). У несимметричных — токи через сопротивление имеют разные значения при одинаковых величинах напряжения, приложенного в разных направлениях.

В качестве симметричных нелинейных сопротивлений в настоящее время используют как в СССР, так и за границей в основном нелинейные сопротивления на основе карбида кремния; несимметричными являются все виды полупроводниковых выпрямителей и детекторов.

В зависимости от типа контакта нелинейного полупроводникового сопротивления с металлической цепью, различают сопротивления с плоским касанием обоих металлических электродов и точечным касанием одного или двух электродов.

Сопротивления с точечными электродами обладают меньшим значением собственной емкости, проявляющейся, как правило, при работе сопротивления на высоких частотах.

В высоковольтной технике в течение более чем четверти века уверенно используются мощные нелинейные полупроводниковые сопротивления на основе карбида кремния для грозозащиты аппаратуры и изоляции линий передач.

Низковольтные НПС и высоковольтные маломощные сопротивления, предназначенные в основном для телевизоров, нашли себе практическое применение в СССР и за рубежом в последнее **десятилетие.**

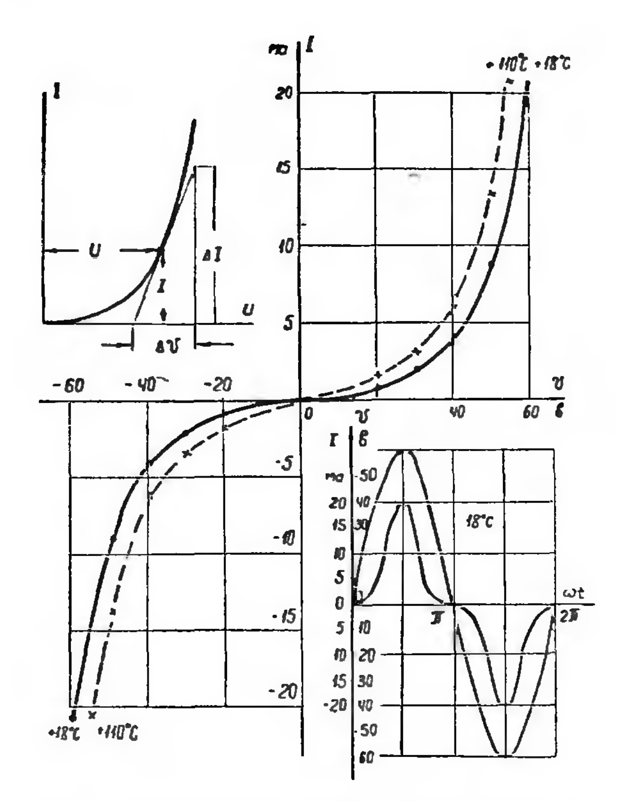


Рис. 1. Вольтамперная характеристика одного из типов нелинейных сопротивлений и зависимость тока от времени при синусоидальном напряжении. В левой верхней части рисунка показано определение проводимостей нелинейного сопротивления.

Разработка различных низковольтных маломощных НПС велась в Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина), во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина, в Ленинградском филиале ГИЭКИ, в Киевском политехническом институте и в других научно-исследовательских и производственных организациях

Серийный выпуск низковольтных НПС с 1958 г. производился Таллинским радиотехническим заводом им. Х. Пегельмана, выше перечисленными и другими организациями.

За рубежом НПС выпускаются в ГДР, ЧССР, КНР, США, Швеции, ФРГ и других странах.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Нелинейные сопротивления можно характеризовать величиной проводимости или сопротивления при данном значении приложенного напряжения, а также дифференциальной проводимостью или сопротивлением при том же напряжении.

В соответствии со сказанным, электропроводность

$$\sigma_c = \frac{I}{U} \quad \text{или} \quad R_c = \frac{U}{I} \tag{1}$$

и

$$\sigma_д = \frac{dI}{dU} \quad \text{или} \quad R_д = \frac{dU}{dI}. \tag{2}$$

Дифференциальная проводимость может быть найдена по тангенсу угла наклона касательной к вольтамперной кривой в данной точке, с учетом масштаба по осям, как показано в левой верхней части рис. 1.

Коэффициентом нелинейности сопротивления назовем отношение

$$\beta = \frac{\sigma_д}{\sigma_c} = \frac{R_c}{R_д} = \frac{dI \cdot U}{dU \cdot I}. \tag{3}$$

Для сопротивления с любой линейной характеристикой это отношение будет равно 1. Для нелинейных вольтамперных кривых оно отличается от единицы.

Если коэффициент нелинейности не зависит от приложенного к НПС напряжения, то вольтамперная кривая сопротивления соответствует уравнению:

$$\beta = \frac{dI \cdot U}{dU \cdot I} = \text{const}; \quad \int \frac{dI}{I} = \beta \int \frac{dU}{U}; \quad \ln I = \beta \ln U + \ln B;$$

$$I = BU^{\beta}. \tag{4}$$

В некоторых иностранных и советских работах вольтамперные кривые нелинейных сопротивлений из различных материалов на основе карбида кремния аппроксимируются уравнениями (4) или (5)

$$U = AI^{\alpha}, \tag{5}$$

где A, B, α, β — постоянные,
причем

$$\beta=\frac{1}{\alpha} \quad \text{и} \quad B=A^{-\frac{1}{\alpha}}=A^{-\beta}.$$

Коэффициент нелинейности можно вычислять по выражению:

$$\beta=\frac{\lg\frac{I_2}{I_1}}{\lg\frac{U_2}{U_1}}=\frac{\lg I_2-\lg I_1}{\lg U_2-\lg U_1}; \tag{6}$$

где I_2, I_1, V_2, V_1 — величины токов и напряжений в выбранном узком диапазоне значений.

Для используемых в практике материалов коэффициент нелинейности β оказывается функцией напряжения. Экспериментальная зависимость β от напряжения в достаточно широком интервале значений приложенного напряжения соответствует уравнению:

$$\beta=\frac{b}{2}\sqrt{U}+1, \tag{7}$$

где b — постоянная нелинейности с размерностью вольт $-\frac{1}{2}$.

В этом случае уравнение вольтамперной характеристики НПС запишется в виде:

$$\beta=\frac{dI\cdot U}{dU\cdot I}=\frac{b}{2}\sqrt{U}+1;\ \int\frac{dI}{I}=\frac{b}{2}\int\frac{dU}{\sqrt{U}}+\int\frac{dU}{U};$$

$$\ln I=b\sqrt{U}+\ln U+C; \quad I=\sigma_0 e^{b\sqrt{U}}\cdot U=\sigma\cdot U, \tag{8}$$

где C — постоянная интегрирования;
σ — меняющаяся в зависимости от напряжения электропроводность сопротивления;
σ_0 — электропроводность в слабых полях.

Хотя механизм явлений у варисторов иной, чем у термосопротивлений, однако температура окружающей среды оказывает влияние на их характеристики.

Для оценки влияния можно пользоваться выражением:

$$R=Me^{\frac{m}{T}}; \quad TKR=\frac{1}{R}\cdot\frac{\partial R}{\partial T}; \quad TKR=-\frac{m}{T^2}, \tag{9}$$

где M и m — постоянные, характеризующие сопротивление при определенном значении приложенного напряжения;
TKR — температурный коэффициент сопротивления (град. $^{-1}$).

Для практических целей удобно пользоваться температурным коэффициентом изменения тока при различных значениях приложенного напряжения:

$$TKI=\frac{1}{I}\cdot\frac{\partial I}{\partial T}\cdot\text{град}^{-1}. \tag{10}$$

Мощность, выделяющаяся в сопротивлении при включении его на постоянное напряжение:

$$P=U\cdot I. \tag{11}$$

При включении на переменное синусоидальное напряжение кривая тока будет соответствовать выражению (12) при амплитудном значении 60 *в* (см. правую нижнюю часть рис. 1).

$$I=\sigma_0 e^{b\sqrt{U_m\sin\omega t}}\cdot U_m\cdot\sin\omega t. \tag{12}$$

Ввиду симметрии кривой относительно оси абсцисс и оси, проходящей между точками пересечения кривой с осью абсцисс, гармонический ряд получается упрощенным.

Средняя активная мощность может быть подсчитана по первой гармонике тока:

$$P_a=\frac{U_m\cdot I_{m_1}}{2}. \tag{13}$$

Значение амплитуды первой гармоники

$$I_{m_1}=\frac{4\sigma_0 U_m}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}}\exp(b\sqrt{U_m\cdot\sin\omega t})\cdot\sin^2\omega t\cdot d(\omega t) \tag{14}$$

содержит интеграл, взятие которого представляет трудности и не оправдывается с точки зрения затраты времени, а поэтому для нахождения первой гармоники тока применяют графические методы.

3. МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

В настоящее время основным сырьем для изготовления нелинейных полупроводниковых сопротивлений служит технический карбид кремния (SiC). Карбид кремния стехиометрического состава содержит 70,045% Si и 29,955% C. В природе этот материал встречается крайне редко и в ограниченных количествах.

Технический карбид кремния изготовляется в электрических печах восстановлением двуокиси кремния (кварцевого песка) углеродом при температуре порядка 2000° С.

При этом образуются гексагональные *α* модификации SiC с постоянной решеткой $a \approx 4{,}3$ Å. Карбид кремния при нормальном давлении не имеет жидкой фазы и при температурах свыше 2000—2700° С возгоняется.

В зависимости от сырья и проведения технологического процесса получаются бесцветные, светло-зеленые или черные и сине-фиолетовые кристаллы карбида кремния. В печи образуются сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые друзами, которые после размола дают порошки с остроконечными, зубчатыми зернами с различной гранулометрией со средними размерами от 40 до 300 микронов.

Окраска и тип электропроводности кристаллов SiC определяется наличием посторонних примесей, а также избытком C или Si по сравнению со стехиометрическим составом. Примесь элементов Fe, N, P дает зеленую окраску и проводимость типа *n*, элементы Ca, Mg, Al дают голубую и фиолетовую окраску (в толстых слоях черную) и проводимость *p*-типа. Избыток Si дает n — SiC, а избыток C дает *p* — SiC.

Величина собственной проводимости кристаллов колеблется в очень широких пределах от 10^{-13} *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$ до 5 *ом*$^{-1}$ *см*$^{-1}$. Электропроводность зависит также от направлений в кристалле.

В настоящее время известно более семи модификаций SiC.

Некоторые физические характеристики карбида кремния приведены в табл. 1.

Вопрос о механизме действия нелинейных полупроводниковых сопротивлений (варисторов) на основе карбида кремния обсуждался в большом числе работ и до настоящего времени является дискуссионным. Единственно установленным можно считать только то, что нелинейность их вольтамперной характеристики связана с явлениями на контактах или на поверхности кристаллов, а не с изменением проводимости самого тела кристалла.

Обобщая итоги исследований различных авторов, можно отметить существование четырех причин, объясняющих нелинейную проводимость карбидкремниевых сопротивлений.

1. Явление замыкания контактных зазоров между зернами SiC при нарастании приложенного напряжения и увеличении эффективной площади сечения сопротивления. Механизм этого процесса обусловливается автоэлектронной эмиссией из острых зубцов и граней кристаллов карбида кремния.

2. Увеличение проводимости и частичный пробой оксидных пленок при сильных электрических полях, напряженностью свыше 10^3—10^4 *в/см*.

3. Микронагрев контактирующих точек между кристаллами карбида кремния, приводящий к возрастанию проводимости контактов. При этом количество выделяющегося тепла невелико, и нагрев в макроскопическом смысле иногда может и не наблюдаться.

Таблица 1

Свойства кристаллов карбида кремния

№ п/п	Свойства	Единица измерения	Численное значение	Примечание
1	Молекулярный вес	—	40,07	
2	Плотность	$\frac{г}{см^3}$	3,2	
3	Коэффициент теплопроводности	$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	$0{,}02 \div 0{,}08$	при различной электропроводности
4	Удельная теплоемкость	$\frac{кал}{г \cdot град}$	$0{,}15 \div 0{,}18$	20°С
5	Температурный коэффициент линейного расширения	$град^{-1}$	$(4 \div 7) \cdot 10^{-6}$	
6	Твердость по минералогической шкале	—	$9{,}5 \div 9{,}75$	по Моосу
7	Ширина запрещенной зоны	*эв*	$2{,}8 \div 3{,}1$	определена по длинноволновому краю основной полосы поглощения
8	Подвижность электронов	$\frac{см^2}{в \cdot сек}$	$100 \div 350$	при 20°С
9	Подвижность дырок	$\frac{см^2}{в \cdot сек}$	$10 \div 30$	
10	Относительная диэлектрическая проницаемость	—	$6{,}5 \div 7{,}5$	

4. Образование на поверхности кристалла физических и химических запорных слоев.

Каждая из вышеперечисленных причин объяснения нелинейности имеет своих сторонников и экспериментальные данные, подтверждающие правильность высказанных положений.

В реальных условиях эти механизмы скорее всего параллельны друг другу или проявляются последовательно по мере изменения напряжения на электродах сопротивления. Например, при низких напряжениях ток идет через контактирующие поверхности с запирающими слоями, при более высоких напряжениях начинают перекрываться зазоры. Наряду с этим вступает в действие контактный микронагрев.

Образование химических запирающих слоев на поверхности кристаллов карбида кремния объясняет большое влияние некото-

рых технологических операций на свойства НПС, изготовленных из одного и того же порошка карбида кремния. К таким операциям особенно следует отнести высокотемпературный обжиг заготовок НПС. Кроме того, можно производить диффузию нужных примесей в карбид кремния до изготовления НПС.

В литературе [7] были приведены данные о том, что нелинейность НПС на основе карбида кремния может быть увеличена за счет активирующих добавок в связующее вещество сопротивления. Влияние этих добавок объяснялось в связи с их способностью ко вторичной эмиссии электронов. Однако, сейчас можно предполагать, что их влияние более непосредственное, так как они могут являться примесями, изменяющими свойства поверхности кристаллов карбида кремния.

4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НПС

Как указывалось в предыдущем параграфе, нелинейные свойства порошка карбида кремния можно увеличивать, легируя поверхность кристаллов некоторыми примесями. Такое легирование производится диффузией примеси при температуре 1100—1200° С из газовой среды. Для легирования черного карбида кремния с проводимостью *p*-типа необходимы элементы V и выше группы таблицы Менделеева. Они будут создавать на поверхности кристалла тонкий слой с типом проводимости, противоположной по знаку объемной.

Подобная обработка порошка черного карбида кремния азотом дает увеличение коэффициента нелинейности вольтамперной характеристики на 20—30%. Хорошие результаты дает легирование черного карбида кремния фосфором и железом. Зеленый карбид кремния, имеющий объемную проводимость *n*-типа, нужно легировать элементами ниже третьей группы таблицы Менделеева. Например, легирование поверхностного слоя зерен алюминием также способствует повышению коэффициента нелинейности.

Для обеспечения равномерности диффузии во все зерна порошка карбида кремния применяется метод «кипящего слоя». При этом методе струя газа продувается через обрабатываемый порошок, находящийся в конусообразном сосуде. Газовая струя сама перемешивает порошок во время всего цикла обработки. Газ должен быть либо нейтральным, либо способствовать получению на поверхности кристалла нужного типа проводимости.

Для получения стабильных свойств НПС порошок карбида кремния необходимо скрепить связующим веществом, в качестве которого можно использовать глину, ультрафарфор, легкоплавкие стекла, жидкое стекло. О возможности воздействия связки на нелинейные свойства порошка карбида кремния упоминалось выше.

Материал с глинистой связкой и длительным обжигом при 1200° С получил название тирит; со связкой из жидкого стекла, подвергнутый длительной термообработке при 300° С, — вилит. В настоящее время в высоковольтной технике используется улучшенный материал — тервит. Низковольтные нелинейные полупроводниковые сопротивления чаще всего изготовляются из материала типа лэтин. Здесь в качестве связки используется ультрафарфор и обжиг производится при высокой температуре 1400—1700° С за очень короткое время (термоудар).

Общая схема технологического процесса изготовления НПС на неорганической связке представлена на рис. 2. Карбид кремния применяется черный (для низковольтных НПС) и зеленый (для высоковольтных-телевизионных НПСВ).

Порошки выбираются со средним размером зерен от 40 до 150 *мк*. Более крупные порошки нежелательны, так как делают сопротивление неоднородным. Для НПСВ берут более мелкие порошки.

Процентное содержание связки в массе может изменяться от 10 до 40%. Для низковольтных НПС нужно брать меньшее содержание связки.

Отпрессованные заготовки НПС поступают на обжиг. Обжиг — одна из основных операций технологического процесса, во многом определяющая свойства готовых сопротивлений. Различают три вида обжига: а) низкотемпературный (до 800° С); б) высокотемпературный длительный (800° С — 1300° С в течение нескольких часов); в) высокотемпературный кратковременный (1300—1700° С от 1 до нескольких минут).

Низкотемпературный обжиг применяется при соответствующей связке во избежание активного воздействия связки и среды на поверхность кристаллов карбида кремния. Однако при этом обжиге трудно получить хорошую механическую прочность готовых сопротивлений. Стабильность параметров также будет пониженной.

Высокотемпературный длительный обжиг, наоборот, предполагает дополнительное воздействие газовой среды печи или активных веществ, находящихся в связке, на карбид кремния. Он дает хорошие результаты при изготовлении высоковольтных НПС из зеленого карбида кремния со связкой — ультрафарфор с добавкой MgO—5%. Обжиг производится в обычных силитовых печах.

Высокотемпературный кратковременный обжиг специально разработан для получения низковольтных НПС. Ввиду того, что в данном случае используется черный карбид кремния, а в качестве связки ультрафарфор, содержащий примеси «вредные» для черного SiC (Ba, Ca), пришлось резко сократить время нагрева образцов, одновременно увеличив температуру нагрева для лучшей спекаемости их. Короткое время нагрева и малый рабочий объем печи способствует также меньшему окислению поверхности карбида кислородом воздуха. Это тоже ведет к уменьшению рабочего напряжения сопротивлений.

Обжиг проводится в специальной угольной печи сопротивления, обеспечивающей температуру до 2500° С. Нанесение электродов может осуществляться двумя методами:

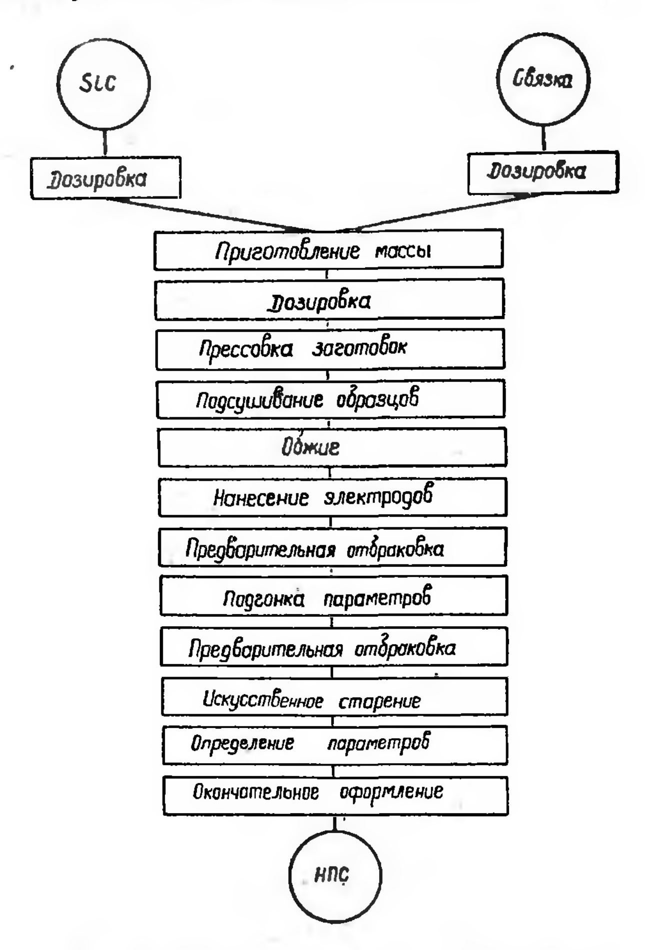


Рис. 2. Общая схема технологического процесса изготовления НПС на неорганической связке.

а) методом вжигания серебра из серебряной пасты;

б) непосредственным нанесением распыленного металла (алюминий, медь) на рабочие поверхности НПС (шоопирование). Первый метод применяется в мелкосерийном производстве. Второй — при крупных партиях выпускаемых сопротивлений.

Определение электрических параметров НПС производится на осциллографической установке (рис. 3). Удобство этой установки

состоит в том, что на экране осциллографа видна вольтамперная характеристика НПС при изменении напряжения от $-U_{\text{ампл}}$ до $+U_{\text{ампл}}$. Выбором сопротивления R_0 и коэффициента усиления осциллографа (ЭО) вертикальная ось градуируется в единицах тока. Горизонтальная развертка делителем R_1, R_2 задается постоянной. Напряжение на НПС измеряется с помощью вольтметра. Для окончательного определения параметров применяются более точные схемы.

Операции «искусственное старение» и окончательное оформление (см. рис. 2) способствуют повышению стабильности параметров НПС во времени и при работе в различных условиях (влажность, загрязненный воздух).

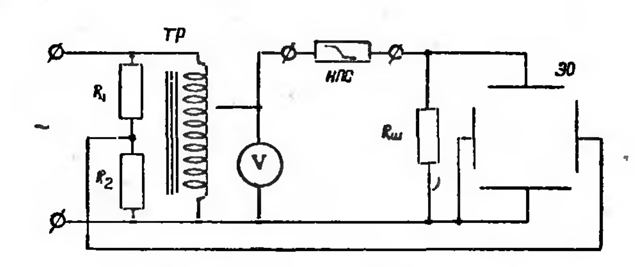


Рис. 3. Схема осциллографической установки для снятия вольтамперных характеристик НПС на переменном токе.

Внешний вид готовых нелинейных сопротивлений различных типов показан на рис. 4.

НПС выпускаются в виде дисков с припаянными выводами или без них (рис. 4, *а*). Для повышения надежности соединения сопротивления со схемой выводы могут дублироваться (рис. 4, *б*). НПС оформляются также в виде стерженьков с металлизированными концами (рис. 4, *в*).

Варисторы могут быть пропитаны влагозащитными составами и покрыты изоляционными декоративными лаками различных цветов или иметь герметизирующие корпуса с выводами.

Сопротивления, рассеивающие значительную мощность, изготовляются из шайб и снабжаются радиаторами охлаждения (рис. 4, *б*).

В ряде случаев в одном корпусе может быть помещено несколько одинаковых или различных варисторов, соединенных между собой по заданной схеме и предназначенных для выполнения определенных электротехнических функций. Иногда в одном корпусе с варисторами могут находиться линейные сопротивления и термосопротивления. Такие изделия представляют собой варисторные блоки и получают отдельную маркировку и название (рис. 4, *д*, *е*).

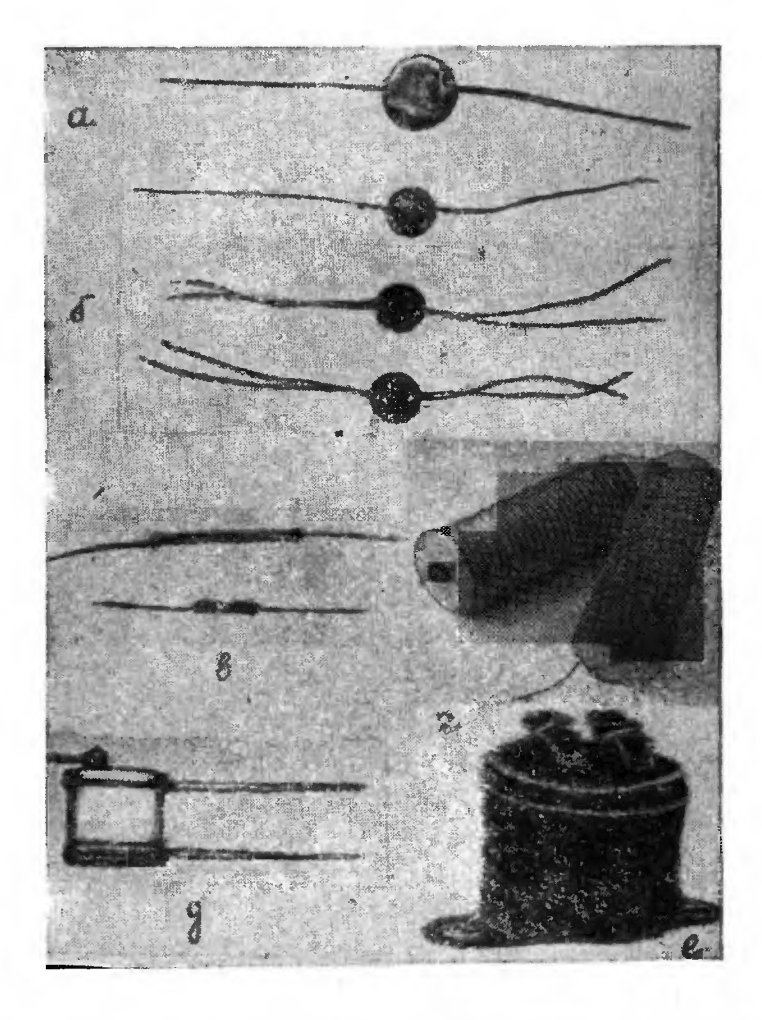


Рис. 4. Внешний вид нелинейных полупроводниковых сопротивлений и блоков на нелинейных сопротивлениях:

а) низковольтные маломощные НПС для различных целей применения;
б) варисторный шунт;
в) высоковольтные нелинейные полупроводниковые сопротивления — НПСВ;
д) функциональный блок — квадратор;
е) мостовой стабилизатор напряжения.

5. СВОЙСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В Ленинградском электротехническом институте им. В. И. Ульянова (Ленина) разработаны и изготовляются нелинейные полупроводниковые сопротивления на различные рабочие напряжения и различные рассеиваемые мощности.

Основные параметры нелинейных сопротивлений в виде дисков и набранных из шайб даны в табл. 2.

Таблица 2

Пределы основных номинальных параметров дисковых и набранных из шайб НПС

Рабочее напряжение, *в*	Рабочий ток, *ма*	Коэффициент нелинейности
от 3 до 10	0,1—20	2—3,0
„ 10 „ 20	0,1—50	2—4,0
„ 20 „ 50	0,1—1000	2—4,5
„ 50 „ 100	0,1—1000	2—5,5
„ 100 „ 200	0,1— 500	2—6,0

Таблица 3

Основные номинальные параметры мощных НПС для электрооборудования тепловозов и электросварочных агрегатов

Максимальное рабочее напряжение, *в*	Максимальный рабочий ток, *а*	Максимальная мощность рассеивания, *вт*	Максимальный коэффициент нелинейности	Диаметр, *мм*: рабочей шайбы	Диаметр, *мм*: радиатора	Длина столбика, *мм*	Количество рабочих шайб
300	0,05	15	4,5—5	20	30	25	5
220	0,45	100	4—4,5	30	80	160	20
127	1,2	150	3,5—4	30	80	120	15
40	1,25	50	3—3,5	20	50	50	7

Как видно из таблицы, нелинейные сопротивления могут иметь весьма разнообразные электрические характеристики.

В табл. 3 указаны параметры некоторых типов нелинейных сопротивлений, разработанных для электрооборудования тепловозов и электросварочных агрегатов.

Маркировка низковольтных полупроводниковых сопротивлений производится тремя начальными буквами НПС и тремя числами, обозначающими максимальное рабочее напряжение в вольтах, ток при этом напряжении — в миллиамперах и коэффициент нелинейности в данной рабочей точке. Так, например, сопротивление с максимальным коэффициентом нелинейности $\beta=5$, рассчитанное на максимальный рабочий ток 10 *ма* при напряжении на сопротивлении 50 *в*, имеет марку НПС-50-10-5.

Если данное нелинейное сопротивление необходимо применить при другом значении напряжения ($U_{зад}$), отличающемся от номинального ($U_{ном}$) на $\pm 20\%$, то, аппроксимируя его вольтамперную характеристику при помощи уравнения (4), можно найти его новые параметры в режиме недогрузки или перегрузки. Во втором случае следует помнить, что реальные свойства сопротивления могут измениться за счет его разогрева.

Новое значение коэффициента ($\beta_{опр}$) и тока ($I_{опр}$) находят по выражениям

$$\beta_{опр} \approx \beta_{ном} \pm \frac{\Delta U}{U_{ном}} \cdot \frac{(\beta_{ном}-1)}{2}, \quad (15)$$

$$\frac{I_{ном}}{I_{опр}} = \left(\frac{U_{ном}}{U_{зад}}\right)^{\beta_{опр}}; \; I_{опр} = I_{ном}\left(\frac{U_{ном}}{U_{зад}}\right)^{\beta_{опр}}, \quad (16)$$

где $I_{ном}$ — номинальное значение тока;
$I_{опр}$ — определяемое значение тока;
$\beta_{ном}$ — номинальное значение коэффициента нелинейности;
$\beta_{опр}$ — определяемое значение коэффициента нелинейности.

Используя выражения 15 и 16, можно записать в качестве примера параметры одного и того же сопротивления следующим образом:

$U_{зад}=30$ *в*; $U_{ном}=35{,}5$ *в*; $U_{зад}=40$ *в*.

НПС-30-10-2,85; НПС-35, 5-15-3; НПС-40-22-3,13.

Остальные характеристики легко подсчитать по трем основным известным нам параметрам НПС. Телевизионные типы стержневых высоковольтных нелинейных полупроводниковых сопротивлений маркируются НПСВ. Последняя буква подчеркивает, что сопротивление высоковольтное. Диаметр стержней от 3 до 10 *мм*, длина до 60 *мм*. Диаметр радиатора 15 *мм*. Параметры сопротивлений НПСВ приведены в табл. 4.

Сопротивление, вольтамперная характеристика которого дана на рис. 1, исследовалось при различных температурах в интервале $-80°\,C \div +110°\,C$. Вольтамперная характеристика, снятая при температуре $+110°\,C$, показана пунктиром на этом же рисунке.

Таблица 4

Параметры НПСВ

№ по рисунку	Максимальное рабочее напряжение, *кв*	Максимальная рассеиваемая мощность, *вт*	Максимальный коэффициент нелинейности
1	1	0,25	5,5—6
2	10	0,4	7
3	20	10	7

Нелинейные полупроводниковые сопротивления имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления. При комнатной температуре значение этого коэффициента колеблется в пределах $-0{,}3 \div -0{,}5\% \cdot град^{-1}$. При уменьшении температуры он увеличивается, с увеличением температуры — уменьшается. Закон изменения примерно совпадает с выражением (9). Коэффициент нелинейности β в этом интервале изменения температуры изменяется мало.

Нелинейные сопротивления, непосредственно после изготовления, в течение некоторого времени меняют свои электрические параметры при хранении, как это видно из рис. 5. Изменение характеристик НПС наблюдается и в том случае, если подвергнуть их воздействию температурных циклов нагрев — охлаждение (рис. 6).

Рис. 5. Зависимость тока образцов НПС от времени хранения в различных условиях:

1 — в эксикаторе с сухим воздухом над хлористым кальцием; *2* — в эксикаторе с 98%-ной влажностью воздуха.

Данные рис. 5 и 6 показывают, что после хранения в течение 10—20 суток в комнатных условиях или после тренировки 8—9 температурными циклами НПС в большой степени стабилизируют свои параметры. На этом основана операция «искусственное старение» в технологическом процессе изготовления НПС.

Ввиду того, что явление нелинейности связано с процессами в микрозазорах между зернами карбида кремния, то, очевидно, что влажность окружающего воздуха должна влиять на параметры НПС. Это влияние иллюстрируется рис. 5.

Увеличение тока (кривая 2) в первые дни обусловлено изменением проводимости образца под действием влаги до некоторого

предельного значения, после чего дальнейшие изменения определяются процессами старения материала под действием влаги. Изменение параметров за счет воздействия влаги идет значительно быстрее, чем в сухом воздухе.

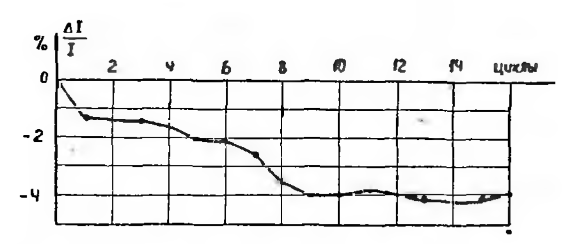


Рис. 6. Относительное изменение тока образцов НПС под воздействием циклов нагрева от +20 до +120° С.

Исследование пористости сопротивлений для выяснения методов влагозащиты показали, что пористость имеет макроскопический характер. Поэтому весьма эффективными являются простейшие методы защиты НПС — путем покрытия слоем лака, либо пропиткой церезином или компаундами. В особо ответственных случаях следует прибегать к полной герметизации НПС — запайке во влагонепроницаемые корпуса.

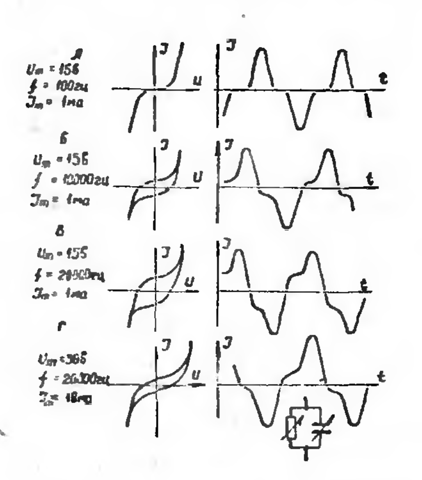


Рис. 7. Динамические вольтамперные характеристики и осциллограммы тока для нелинейного сопротивления при различных частотах. В нижней части рисунка показана эквивалентная схема НПС.

Образцы нелинейных сопротивлений с различными параметрами ставились на длительное испытание при перегрузке по вызывающей нагрев мощности образцов на 40÷50° С выше температуры окружающего воздуха.

Работа при перегрузке в течение 200 часов не вызывает существенных изменений параметров.

Влияние частоты приложенного напряжения на характеристики НПС показано на рис. 7 для одного из видов нелинейных сопротивлений.

В нижней части рисунка приводится эквивалентная схема, с помощью которой можно объяснить получающиеся результаты.

При низких частотах, когда емкостное сопротивление велико, ток практически только активный. При повышенных частотах емкостное сопротивление становится сравнимым

с величиной активного сопротивления при малых напряжениях и появляется емкостная составляющая тока, создающая петлю вольтамперной характеристики сопротивления.

С увеличением напряжения активное сопротивление уменьшается, преобладает активный ток, и на концах кривых раздвоения нет.

Эти же представления подтверждаются сравнением осциллограмм В и Г. При больших напряжениях той же частоты гистерезисный шлейф получается более узким.

Собственная емкость сопротивления с плоскими электродами колеблется в пределах до сотни *пф/см²*. Стерженьковые сопротивления имеют значительно меньшую собственную емкость, не превышающую 20—30 *пф*.

6. ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Все применения НПС в электротехнике и электронике можно свести к четырем основным направлениям:

а) защите от перенапряжений;

б) стабилизации напряжения и токов;

в) регулировке как электрических, так и механических величин;

г) преобразованиям частотным и функциональным.

Объем данной брошюры не позволяет достаточно полно характеризовать и проиллюстрировать конкретными примерами каждое из этих направлений. Поэтому будут разобраны лишь некоторые частные случаи. Более полное освещение этого вопроса читатель найдет в литературе [3].

Известно, что в момент разрыва цепи с индуктивностью на размыкающихся контактах возникает импульс напряжения, который может существенно превышать напряжение на индуктивности в статическом режиме. Амплитуда этого импульса зависит от величины индуктивности, тока в цепи и скорости размыкания контактов. Возникающий импульс напряжения приводит к образованию дугового разряда бо́льшей или меньшей длительности между расходящимися контактами (искры). Это приводит к разрушению контактов, а в некоторых случаях просто недопустимо из-за взрывоопасности окружающей среды. Такие условия работы электрических контактов могут возникнуть в шахтах, химической промышленности, текстильном производстве.

Нелинейные полупроводниковые сопротивления (варисторные шунты) успешно применены для обеспечения искробезопасности аппаратуры шахтной связи [4]. Обеспечение искробезопасности достигается включением НПС параллельно источнику перенапряжения.

На рис. 8 приведена схема испытания на искробезопасность отдельных элементов аппаратуры шахтной связи. Взрывная камера наполняется взрывоопасной смесью и служит индикатором воз-

никновения между расходящимися контактами электрической искры. Из рисунка ясен также принцип включения в схему нелинейных сопротивлений с четырьмя выводами. Так как современная аппаратура шахтной связи работает на переменном токе высокой частоты, то применение НПС дает лучшие результаты, чем применение варикондов (нелинейных конденсаторов из сегнетокерамики) или полупроводниковых диодов. Вариконды обладают большой емкостью и вносят дополнительные трудности в обеспечение нормальной работы аппаратуры связи. Кроме того, вариконды являются активными элементами (аккумуляторами энергии), поэтому при последующем, достаточно быстром замыкании коммутирующих контактов образуется искра за счет разряда вариконда.

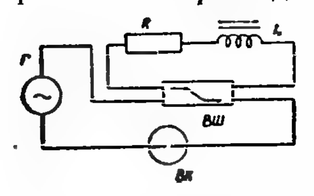


Рис. 8. Схема испытания на искробезопасность элементов аппаратуры высокочастотной шахтной связи:

Г—генератор переменного сигнала; *ВК*— взрывная камера; *ВШ*—варисторный шунт (НПС с четырьмя выводами в соответствии с рис. 4, *б*).

Для обеспечения аналогичного эффекта с помощью полупроводниковых выпрямителей, необходимо использовать два диода в последовательно встречном включении. Это ведет к усложнению схемы.

Точно такое же применение нашли НПС в схемах управления трикотажными машинами на одном из заводов г. Ленинграда.

Применение НПС с целью уничтожения электрической искры на контактах, размыкающих цепь, содержащую индуктивность, целесообразно также для предохранения контактов от быстрого разрушения. Подобные условия работы контактов наиболее часто имеют место в автоматической телефонии. Исследование искрогашения на размыкающихся контактах с помощью НПС показали возможность их использования в цепях с реле различных типов.

Например, электромагниты МКС, контакты которых защищались с помощью НПС, выдерживают более $5 \cdot 10^7$ срабатываний. Замедление времени срабатывания реле, которое вносит НПС, не превышает $20 \div 30\%$. Это в несколько раз меньше, если осуществлять искрогашение, например, с помощью обычного линейного сопротивления. В данном случае НПС обычно включается параллельно размыкающимся контактам.

Точного расчета, связывающего параметры НПС с параметрами цепи, в которой происходит искрогашение, не существует. Часто оказывается возможным воспользоваться следующим приближенным выражением для выбора параметров НПС—$U—kI_L—\beta$,
где U — напряжение источника питания;
I_L — ток в цепи в установившемся режиме;
β — коэффициент нелинейности НПС;
k — токовый коэффициент.

Коэффициент k обычно имеет значение от 0,1 до 0,01, β нужно выбирать максимальное для данного типа НПС, причем, чем меньше k, тем больше должен быть коэффициент нелинейности.

Мощность, рассеиваемая НПС в режиме, когда к нему приложено напряжение источника питания (см. рис. 8), не должна превышать допустимую.

Защита от перенапряжений электрической аппаратуры и изоляции линий передач высокого напряжения переменного тока производится вентильными разрядниками, рабочими элементами которых являются нелинейные сопротивления. Схема вентильного разрядника показана на рис. 9.

Принцип действия разрядника состоит в следующем. При появлении на линии волны опасного перенапряжения происходит пробой разрядных промежутков и нелинейные дисковые сопротивления оказываются под большим напряжением. Сопротивление дисков резко падает, и на землю течет большой импульсный ток, который может достигать нескольких десятков килоампер. После прохождения волны перенапряжения разрядник оказывается подключенным под рабочее напряжение линии. При снижении напряжения электрическое сопротивление нелинейных сопротивлений возрастает, ограничивая сопровождающий ток промышленной частоты. После прохождения его через нулевое значение электрическая прочность разрядных промежутков восстанавливается и дуга сопровождающего тока гаснет. Защита автоматически отключается и готова к приему новых волн перенапряжения.

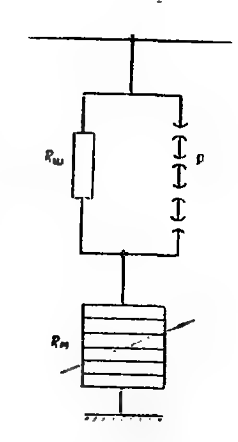


Рис. 9. Схема вентильного разрядника:
р — разрядные промежутки; $R_в$ —нелинейные сопротивления; $R_ш$ — шунтирующие сопротивления.

С помощью НПС можно стабилизировать напряжение постоянного тока. Схема простейшего параметрического стабилизатора на НПС и зависимость выходного напряжения от изменения входного представлены на рис. 10. Коэффициент стабилизации по напряжению для этой схемы можно вычислять по формуле:

$$K_{ст} = \frac{\beta + \frac{R_c}{R_0} + \frac{R_c}{R_н}}{1 + \frac{R_c}{R_0} + \frac{R_c}{R_н}}. \qquad (17)$$

Из выражения (17) видно, что если $R_0 \gg R_c$ и $R_н \gg R_c$, то $K_{ст} \to \beta$. Это значит, что данный стабилизатор наиболее выгодно использовать как источник опорного напряжения. Подобный ста-

билизатор применяется, например, в телевидении для стабилизации анодного напряжения передающих и приемных трубок. Для этой цели разработаны специальные типы высоковольтных телевизионных НПСВ (см. табл. 4). Кроме непосредственной стаби-

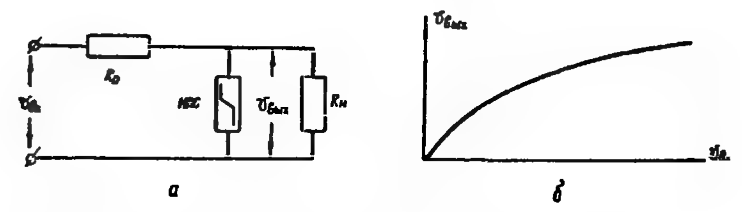


Рис. 10. Простейший стабилизатор напряжения на НПС:
а — схема стабилизатора; R_0 — баластное сопротивление; $R_н$ — сопротивление нагрузки; *б* — внешняя характеристика.

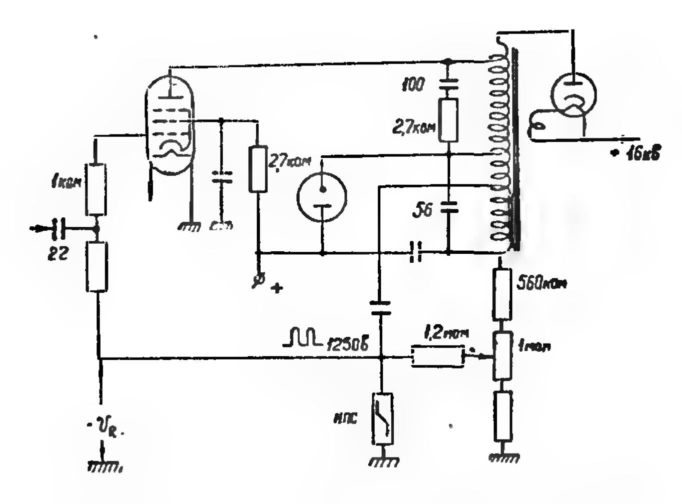


Рис. 11. Схема конечного каскада генератора строчной развертки телевизора фирмы Graetz (ФРГ).

лизации напряжения питания телевизионных трубок, такой стабилизатор может использоваться в конечном каскаде генератора строчной развертки для аналогичных целей. Одна из возможных конкретных схем приведена на рис. 11 [8].

Принцип работы схемы состоит в следующем. Стабилизатор с варистором питается частью высокого напряжения трубки. Это стабилизированное (опорное) напряжение сравнивается с постоян-

ной составляющей от импульсов обратного хода луча. Выделение постоянной составляющей производится также самим варистором, который при наличии на нем постоянного напряжения смещения является выпрямителем. Общее отрицательное напряжение — U_R подается на сетку лампы — генератора строчных импульсов. При изменении амплитуды импульсов строчной развертки меняется амплитуда импульсов обратного хода луча и, следовательно, смещение на сетке лампы. Это изменение смещения восстанавливает прежнее значение амплитуды импульсов строчной развертки. Та-

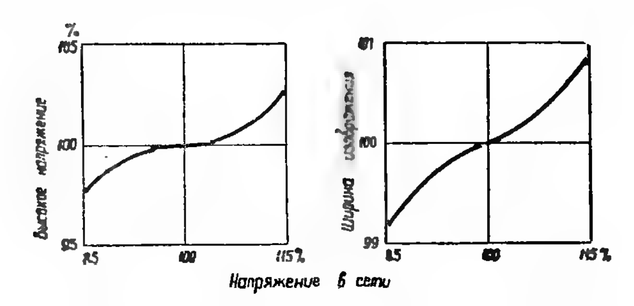


Рис. 12. Изменение ширины изображения на экране телевизионного приемника и высокого напряжения питания трубки от колебания напряжения сети при применении варисторов.

ким образом, изображение на экране трубки оказывается стабилизированным по ширине и не зависит от колебания напряжения сети. Это особенно важно для трубок со 110° отклонения луча. Стабилизированным оказывается также высокое напряжение питания трубки. Оно оказывается не зависящим также от тока луча, т. е. источник высокого напряжения уменьшает свое внутреннее сопротивление. Поэтому четкость изображения не меняется с изменением яркости. На рис. 12 приведены графики изменения ширины изображения и высокого напряжения питания в зависимости от колебания напряжения сети. Графики взяты из литературы [8]. Аналогичным образом стабилизируется высота изображения.

Мостовая схема с НПС и линейными сопротивлениями (рис. 13, *а*) позволяет получить еще лучшую стабилизацию напряжения. Внешняя характеристика такого стабилизатора на постоянном токе показана на рис. 13, *б*. Изменение входного напряжения от U_A до U_B является участком стабилизации. Необходимо подчеркнуть, что мостовая схема так же, как и предыдущая, не стабилизирует напряжение на выходе при изменении сопротивления нагрузки. Коэффициент полезного действия этой схемы низок, т. е. она тоже должна рассматриваться, в основном, как источник опорного напряжения.

Таблица 5

Расчетные формулы для напряжений и токов в мостовой схеме

Величины	Режимы	
	максимального к.п.д.	холостого хода
$U_{вх}$	$\frac{\sqrt{\beta}+1}{\sqrt{\beta}-1} U_{вых}$	$\frac{\beta+1}{\beta-1} U_{вых}$
$U_{нпс}$	$\frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{\beta}-1} U_{вых}$	$\frac{\beta}{\beta-1} U_{вых}$
U_R	$\frac{1}{\sqrt{\beta}-1} U_{вых}$	$\frac{1}{\beta-1} U_{вых}$
$I_{нпс}$	$\frac{1}{\sqrt{\beta}-1} I_{вых}$	$I_{нпс}$
I_R	$\frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{\beta}-1} I_{вых}$	$I_{нпс}$
к.п.д.	$\left(\frac{\sqrt{\beta}-1}{\sqrt{\beta}+1}\right)^2 \cdot 100\%$	0

В табл. 5 приведены расчетные формулы для определения параметров мостовой схемы в двух режимах работы: а) максимального коэффициента полезного действия и б) холостого хода.

Пример расчета.

Необходимо построить стабилизатор, работающий на постоянную нагрузку $R_н$ =const, $I_{вых}=5$ *ма*, $U_{вых}=10$ *в*.

Задаемся возможным значением коэффициента нелинейности НПС, например $\beta=4$. Расчет произведем для режима максимального к. п. д., пользуясь табл. 5:

$$U_{нпс}=\frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{\beta}-1} U_{вых}=\frac{\sqrt{4}}{\sqrt{4}-1}\,10=20\ в;$$

$$I_{нпс}=\frac{1}{\sqrt{\beta}-1} I_{вых}=\frac{1}{\sqrt{4}-1}\,5=5\ ма.$$

Для данного стабилизатора необходимо НПС-20-5-4.

$$U_R=\frac{1}{\sqrt{4}-1}\,10=10\ в; \quad I_R=\frac{\sqrt{4}}{\sqrt{4}-1}\,5=10\ ма;$$

$$R=1\ ком; \quad P_R=0{,}1\ вт.$$

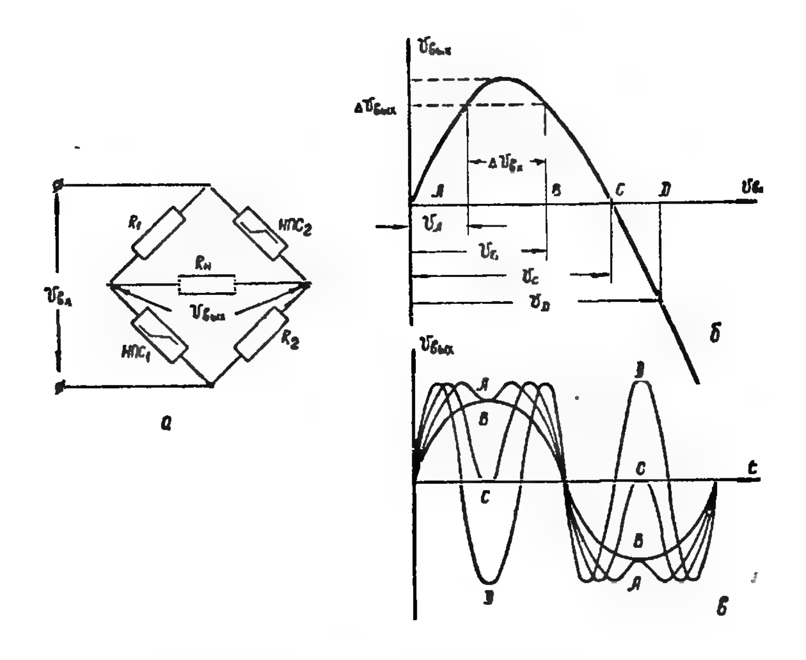


Рис. 13. Мостовой стабилизатор напряжения:
а — схема стабилизатора; *б* — внешняя характеристика на постоянном токе; *в* — напряжение на выходе при $U_{вх}=U_m \sin \omega t$.

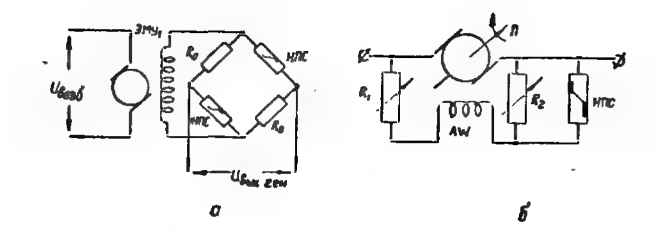


Рис. 14. Схемы включения НПС в обмотки возбуждения электрических машин:
а — электромашинных усилителей-возбудителей;
б — шунтового электродвигателя.

Линейное сопротивление должно быть величиной 1 *ком* и с допустимой мощностью рассеивания не менее 0,1 *вт*.

$$U_{вх}=\frac{\sqrt{4}+1}{\sqrt{4}-1}10=30\ в;\quad I_{вх}=\frac{\sqrt{4}+1}{\sqrt{4}-1}5=15\ ма.$$

Следовательно, источник питания стабилизатора должен обеспечить напряжение 30 *в* при токе 15 *ма*

$$\text{к.п.д.}=\left(\frac{\sqrt{4}-1}{\sqrt{4}+1}\right)^2 100\%=11\%.$$

С помощью нелинейного моста можно осуществить стабилизацию напряжения постоянного тока мощного генератора. На рис. 14, *а* показана схема включения НПС и обмотки возбуждения электромагнитного усилителя-возбудителя. Нелинейный мост стабилизирует поток возбуждения первичного электромагнитного усилителя.

В этой схеме требуется получить на выходе моста ток значительной величины, поэтому НПС рассеивают мощность около 100 *вт*. Так, например, для стабилизации напряжения вспомогательного генератора постоянного тока на газотурбовозе отечественной конструкции были применены НПС мощностью 150 *вт* с рабочим напряжением 35,5 *в* и коэффициентом нелинейности $\beta=4{,}5$.

На рисунке 14, *б* показано включение НПС в обмотку возбуждения шунтового электродвигателя постоянного тока. Этим достигается стабилизация скорости вращения (числа оборотов) ротора при значительном изменении напряжения питания. Сопротивления R_1 и R_2 необходимы для подбора режима стабилизации. В этом случае также применяются НПС, рассеивающие мощность в несколько десятков ватт.

Напряжение на выходе мостовой схемы можно сделать малозависящим от изменения температуры окружающей среды. Это достигается заменой линейных сопротивлений полупроводниковыми термосопротивлениями с ТКR, примерно равным по величине и знаку ТКR НПС.

Термокомпенсированная мостовая схема обычно оформляется в виде отдельного блока, внешний вид которого уже был показан на рис. 4, *в*.

В табл. 6 приводятся сравнительные характеристики существующих источников стабильного напряжения.

Достоинством мостового стабилизатора на НПС является большой срок службы и невысокая стоимость.

Мостовой стабилизатор успешно применяется в схемах стабилизаторов напряжения и тока компенсационного типа. Особенно перспективно их применение в схемах на транзисторах. Одна из таких схем приведена на рис. 15.

Таблица 6

Основные параметры источников стабильного напряжения

Параметры	Нормальный элемент	Кремниевые стабилитроны	Стабилизаторы напряжения на НПС и ТС (мостовые схемы)	Стабилитроны тлеющего разряда
Диапазон напряжений, *в*	1,018	5÷100	0÷150	70÷160
Диапазон токов, *ма*	—	0,001÷1000	0÷50	5÷40
Температурный коэффициент напряжения, %/град	0,001÷0,003	0,01÷0,07	0,003÷0,01	0,002÷0,04
Стабильность выходного напряжения от включения к включению	—	—	±0,05	±3

Схема собрана на кристаллических триодах типа П3Б и П2Б. Термокомпенсированный нелинейный мост с НПС в этой схеме включен непосредственно под стабилизированное выходное напряжение и находится в режиме, при котором рабочая точка лежит вблизи точки С (см. рис. 13, *б*). Это соответствует балансу моста по постоянному току: $U_{вых}=0$, $R_c=R$. Для изменений напряжения на выходе стабилизатора мост не сбалансирован, так как $R\neq R_д$. Следовательно, небольшому изменению напряжения на выходе стабилизатора будет соответствовать некоторое изменение напряжения на эмиттере триода П2Б, которое можно подсчитать по выражению:

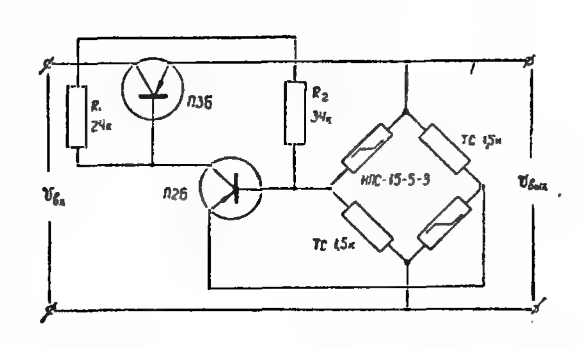


Рис. 15. Схема стабилизатора напряжения на полупроводниковых триодах с нелинейным мостом, включенным на выход двигателя.

$$\Delta U_{э.б.}=\frac{\beta-1}{\beta+1}\Delta U_{вых}. \qquad (18)$$

При больших значениях β $\Delta U_{э.б.}\to\Delta U_{вых}$. Если же рассмотреть относительные изменения напряжений на выходе стабилизатора и на участке эмиттер—база, то последнее будет значительно больше,

чем на выходе стабилизатора. Нелинейные сопротивления в схеме моста находятся примерно при половинном значении выходного напряжения.

Ток, протекающий через НПС и ТС, должен быть значительно больше тока в цепи эмиттера управляющего триода П2Б (например, в 10 раз).

Этот стабилизатор имел напряжение на выходе 33,6 *в* при напряжении на входе 53 *в;* коэффициент стабилизации $K_{ст}=650$ при изменении входного напряжения на $\pm 20\%$; выходное сопротивление 1,5 *ом;* температурный уход 0,05 *в/град.*

На рис. 13,*в* показано изменение формы выходного напряжения мостовой схемы при ее работе на синусоидальном напряжении и изменении амплитуды входного напряжения. Из рисунка видно, что при величине амплитуды, равной U_D на выходе мостовой схемы получается напряжение утроенной частоты. Это еще одно возможное применение мостовой схемы с НПС.

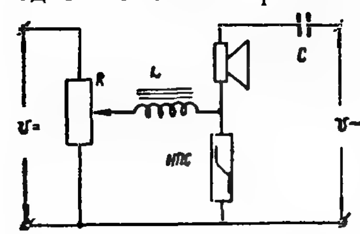


Рис. 16. Схема управления цепью переменного тока за счет воздействия на НПС постоянного управляющего напряжения.

Простейшим случаем применения НПС в качестве управляемого элемента может быть схема рис. 16. В ней используется свойство НПС изменять свое дифференциальное сопротивление переменному току небольшой величины при приложении постоянного напряжения (тока).

Введенные в схему дроссель L и емкость C необходимы для разделения цепей переменного и постоянного тока, в которых НПС служит общим элементом. При включении двухваттного динамика по схеме рис. 16 удавалось менять громкость звука на 5 *дб* при частоте 1000 *гц.*

Достоинством такой схемы является то, что она позволяет очень просто перейти к дистанционному автоматическому управлению или саморегулированию.

Особым видом управляемых нелинейных полупроводниковых сопротивлений являются нелинейные четырехполюсники, выполненные на одном элементе с четырьмя симметрично расположенными электродами, или из четырех НПС, соединенных по мостовой схеме.

На рис. 17,*а* показано четырехэлектродное НПС, к которому приложены основное (U) и управляющее ($U_у$) напряжения. На этом же рисунке приведены вольт-амперные характеристики УНПС, причем кривая *1* получена при $U_у=0$, а кривые *2* и *3* — при $U_у$, равных 100 и 200 *в*. С увеличением управляющего напряжения токи через сопротивление увеличиваются, а нелинейность характеристики уменьшается, и при $U_у=200$ *в* характеристика

становится практически линейной. Иначе обстоит дело, если величины основного и управляющего напряжений увеличиваются синфазно. Получающаяся при этом вольт-амперная характеристика показана пунктиром (кривая *4*).

Таким образом, нелинейность вольт-амперной характеристики УНПС можно уменьшать и увеличивать. Кроме того, если управ-

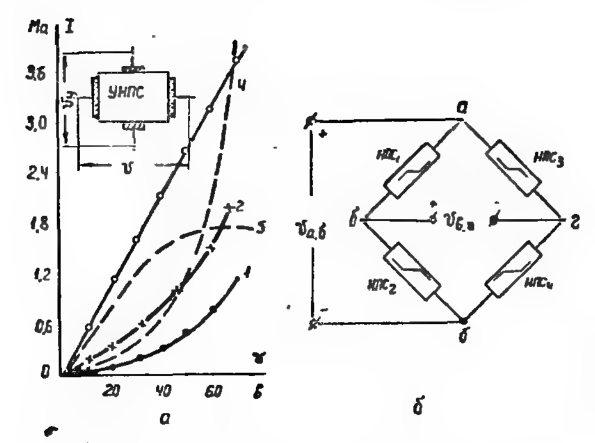


Рис. 17. Нелинейные четырехполюсники:

а — управляемое нелинейное полупроводниковое сопротивление с электродами различных размеров и его вольтамперные характеристики; *1* — при управляющем напряжении, равном нулю; *2* — то же при $U_у=100$ *в*; *3* — то же при $U_у=200$ *в*; *4* — при синфазно возрастающих U и $U_у$; *5* — при сдвиге фаз между U и $U_у=90°$;
б — нелинейный четырехполюсник из четырех НПС (эквивалентная схема УНПС).

ляющее напряжение $U_у$ отстает или опережает по фазе напряжение U на 90°, то вольт-амперная характеристика УНПС будет изображаться пунктирной кривой *5*, существенно отличающейся от обычной вольт-амперной характеристики НПС.

Исследования УНПС показали, что по принципу действия они представляют собой нелинейные мосты и что процессы, происходящие в них, идентичны процессам в нелинейных четырехполюсниках, состоящих из четырех отдельных хорошо подобранных нелинейных сопротивлений (рис. 16,*б*). Практика показала, что в ряде случаев подобрать мостовую схему из четырех отдельных сопротивлений целесообразнее, чем вести подгонку четырех электродов на одном НПС, так как полной однородности свойств по всему объему образца получить не удается.

Управляемые нелинейные сопротивления используются как преобразователи частоты, модуляторы, фазочувствительные детекторы [5]. Кроме того, они могут применяться как функциональные преобразователи. На рис. 16, *а* показано, что вид функциональной зависимости $I=f(U)$ может изменяться с изменением управляющего напряжения. Таким образом, можно получить, например, функцию $I=AU^2$.

Точность воспроизведения может быть достигнута очень большой.

Большой интерес представляет использование самой вольтамперной характеристики НПС с коррекцией, приводящей ее к заданной функциональной зависимости. Такие схемы имеют небольшое число элементов, стабильны во времени, потребляют малые мощности. В настоящее время они широко используются в моделирующих установках постоянного тока и других счетно-решающих устройствах вместо функциональных блоков с кусочной аппроксимацией на диодах.

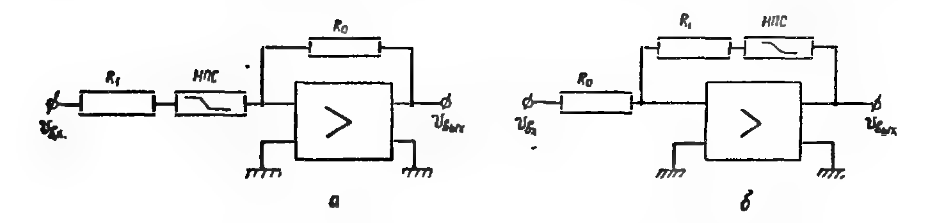


Рис. 18. Блок-схемы функциональных преобразователей: *а* — квадратичной зависимости; *б* — извлечения корня квадратного.

На рис. 18, *а* показана блок-схема простейшего функционального преобразователя для получения квадратичной зависимости $U_{вых}=f(U_{вх}^2)$ и извлечения корня квадратного (18, *б*). Сопротивление R_1 служит корректирующим сопротивлением. Таким же простым способом удается воспроизвести синусоидальную и косинусоидальную зависимости. При исследовании схем рис. 18 оказалось, что для получения минимальной ошибки воспроизведения функции по выбранной схеме необходимо использовать нелинейные сопротивления, имеющие вполне определенное значение коэффициента нелинейности. Так, для воспроизведения квадратичной зависимости и корня квадратного коэффициент нелинейности β должен лежать в интервале $2{,}7 \div 2{,}9$ при $U_{НПС}=0{,}7\ U_{вх\,max}$. При этом можно получить погрешность воспроизведения зависимостей не более ±0,8% от максимальной величины.

При воспроизведении синусоидальной и косинусоидальной зависимостей погрешность не превышает обычно ±0,5% от максимальной величины при изменении входного напряжения, соответствующего изменению аргумента от 0 до ±90°.

Точность воспроизведения можно значительно повысить, если воспользоваться методом кусочно-нелинейной аппроксимации, т. е. разбить весь диапазон изменения на две или более части. Для каждого поддиапазона изменения аргумента функции подбирается свое НПС.

Если мы имеем два одинаковых НПС, хорошо воспроизводящих квадратичную зависимость тока от напряжения, то легко осуществить перемножение двух величин. Принцип перемножения показан на рис. 19, *а*.

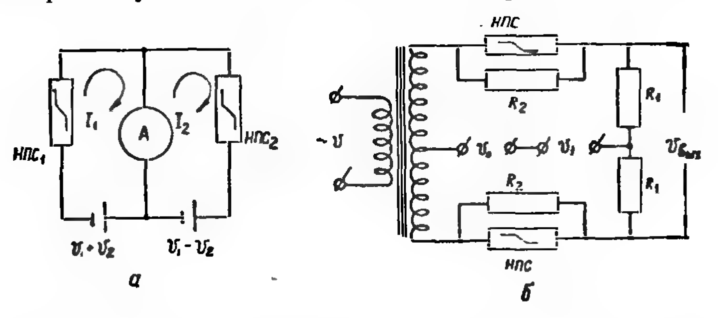


Рис. 19. Принцип перемножения двух величин с помощью НПС (*а*) и принципиальная схема ваттметра постоянного тока на НПС (*б*).

На основании этого рисунка можно написать:

$$I_1 = B(U_1+U_2)^2,$$

соответственно ток I_2 будет равен:

$$I_2 = B(U_1-U_2)^2.$$

Прибор в диагонали покажет нам разность этих токов, которая, как нетрудно установить, будет равна:

$$I = I_1 - I_2 = 4BU_1 \cdot U_2 = f(U_1 \cdot U_2).$$

По принципу перемножения двух величин строятся ваттметры, предназначенные для работы с автоматическими устройствами или датчиками для дистанционного измерения и управления мощностью. Одно из напряжений (U_1) при этом пропорционально величине тока. На рис. 19, *б* приведена принципиальная схема ваттметра. В схему введено дополнительное напряжение смещения U_0, которое необходимо для получения знакопостоянных функций токов I_1 и I_2 при периодических напряжениях U и U_1.

С помощью нелинейных сопротивлений можно расширить динамический диапазон усилителей на электронных лампах. Это достигается за счет уменьшения коэффициента нелинейных искажений усилителя.

На рис. 20 показано графически уменьшение нелинейных искажений выходного сигнала при усилении на электронной лампе типа 6Ж7. В анодную нагрузку включено соответствующим обра-

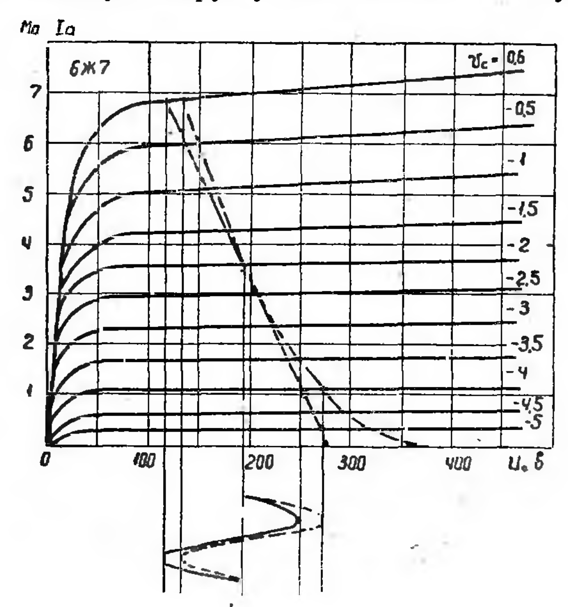


Рис. 20. Графическое построение, показывающее возможность уменьшения нелинейных искажений усилителей на электронных лампах.

зом подобранное сопротивление (на рисунке вольтамперная характеристика НПС показана пунктиром). Такое включение НПС особенно желательно в предоконечных каскадах усилителей мощности звуковых частот.

Кроме улучшения качества за счет уменьшения коэффициентов нелинейных искажений, можно получить большую амплитуду сигнала, а следовательно, и мощность, если допустить прежнее значение коэффициента нелинейных искажений.

Включение НПС в катодную цепь создает нелинейную отрицательную обратную связь, причем коэффициент нелинейных искажений при этом может возрасти, но в некоторых схемах это не является существенным. Нелинейное сопротивление в катодной

цепи может выполнять роль автоматической регулировки коэффициента усиления, если, например, будет заменена лампа или изменится ее крутизна.

НПС в схемах широкополосных усилителей постоянного тока позволяют расширить частотный диапазон при усилении малых сигналов.

Приведем для примера схему широкополосного усилителя (рис. 21), в которой были применены НПС для усиления однополярных импульсов относительно большой длительности.

НПС и сопротивление R_3 образуют делитель напряжения с различными коэффициентами передачи для напряжений, создающих режим работы схемы по постоянному току, и для малых напряжений усиливаемого сигнала. Так как коэффициент нелинейности $\beta > 1$, то на R_3 можно получить меньшее падение напряжения постоянной составляющей, чем при аналогичном использовании линейного сопротивления вместо НПС. Это позволяет в следующем каскаде понизить падение напряжения в катодной цепи, создающее компенсирующее напряжение (50 *в*), а следовательно, и уменьшить отрицательную обратную связь.

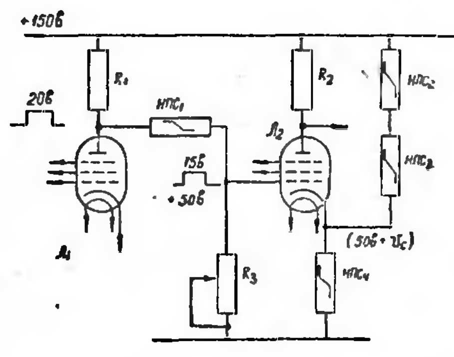


Рис. 21. Схема широкополосного усилителя импульсных напряжений с применением НПС.

Цепь, составленная из НПС₂, НПС₃, НПС₄, представляет делитель напряжения, он имеет один и тот же коэффициент передачи по напряжению переменной и постоянной составляющих. Однако для переменной составляющей делитель имеет сопротивление в β раз меньше. По этой же причине указанная цепочка нелинейных сопротивлений создает меньшую по величине отрицательную обратную связь в катодной цепи для малого сигнала.

Если лампа $Л_2$ изменит свои параметры или будет заменена лампой с другой величиной тока, то это приведет к соответствующему изменению R_{c4} и падение напряжения на НПС₄ изменится в меньшей степени, чем это было бы при использовании линейных сопротивлений. Так, для одной из схем, аналогичной рис. 21, в которой применялись НПС-50-20-4, были получены следующие результаты. В цепочке делителя НПС₁—R_3 коэффициенты передачи были: по постоянной составляющей напряжения — 0,3; по переменной составляющей — 0,75. В цепочке НПС₂, НПС₃, НПС₄ при увеличении тока в лампе $Л_2$ на 20 *ма* напряжение на катоде изменилось на 5 *в*, в то время как при делителе на линейных сопро-

тивлениях, имеющем тот же ток, это изменение составило бы примерно 30 *в*. Для получения результата, эквивалентного цепочке с НПС, необходим делитель с начальным током примерно 140 *ма* вместо 20 *ма*.

Применение НПС в различных схемах импульсных генераторов и усилителей позволяет получить более благоприятные режимы работы электронных ламп. Известно применение НПС в триггерной схеме в цепи связи анод входной лампы — сетка выходной.

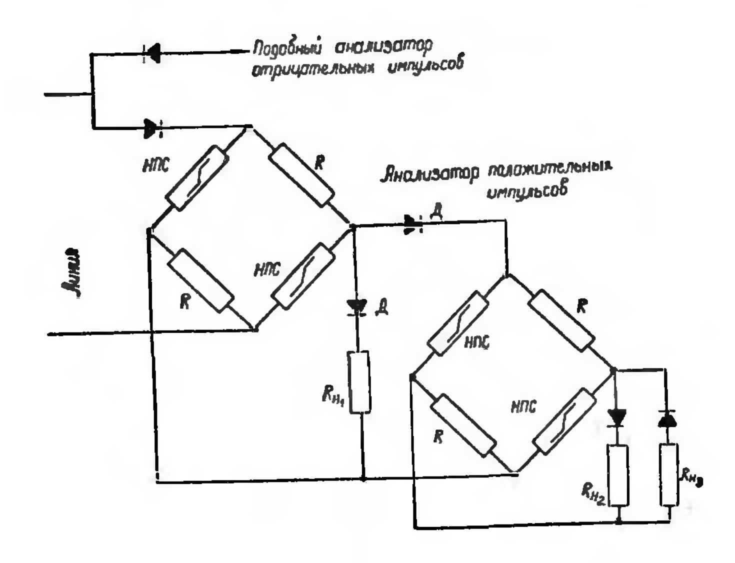


Рис. 22. Схема уплотнения линии сигнализации с анализатором импульсов по амплитуде, собранном на НПС.

Такое включение позволило в полтора раза увеличить амплитуду выходного импульса по сравнению с аналогичным использованием линейных сопротивлений (при несколько ином режиме ламп триггера).

В заключении раздела о применении НПС хочется еще раз вернуться к мостовой схеме с линейными и нелинейными сопротивлениями. Если несколько нелинейных мостов включить, как показано на рис. 22, то возможно направлять сигналы с различными значениями напряжений в соответствующие каналы. Такое устройство позволяет уплотнить линии связи, если сигналы кодируются по амплитуде, а поступление их раздельно по времени.

В заключении раздела о применении НПС хочется еще раз большим достоинством. Диоды в схеме выполняют роль ключей при изменении знака напряжения на выходе мостовой схемы.

Значение напряжения на входе каждого мостика в момент переключения каналов определяется удвоенной величиной напряжения НПС, при которой его статическое сопротивление равно линейному сопротивлению *R*.

В качестве нагрузок могут применяться исполнительные устройства, включенные либо непосредственно под выходное напряжение мостика, либо через промежуточные усилители, если мощность недостаточна для питания исполнительного устройства.

Для надежности работы мостовые схемы должны быть термокомпенсированы.

Из всего вышеизложенного следует, что нелинейные полупроводниковые сопротивления (варисторы) являются еще далеко не использованным резервом полупроводниковой техники и широкое применение их представляет существенный интерес для народного хозяйства.

Литература

1 Н П Богородицкий, З Ф Воробей ЖТФ, т XXIV, вып 5, 1954

2 В В Пасынков, Г А Савельев, Л К Чиркин Нелинейные полупроводниковые сопротивления Судпромгиз, 1962

3 Л И Иванов, В И Пружинина-Грановская ЖТФ, т XXVI, в 1, 1956

4 М А Рольник Искробезопасные системы и аппараты шахтной связи Госгортехиздат, 1961

5 О М Кудрявцев Электричество, № 9, 1960

6 С Coffaux Rev Gen d'Electr, 66, 1957

7 M S Teszner, P Seguin, I Millet Ann Telecomm, t 8, n 8—9, 1953

8 M S Teszner Bull Soc Franc Electr, t IV, n 40, 1954

9 Kronke Funk — Technik, № 9, 1955

Пасынков Владимир Васильевич, Окунев Юрий Тимофеевич

Нелинейные полупроводниковые сопротивления (варисторы)

Изд редактор *Д. П. Фрегер* Техн. редактор *И. А Белогурова*

Ленинградский Дом научно-технической пропаганды (ЛДНТП), Невский пр, 58

М-29337 Тип ЛДНТП Зак 248 Тир 10000 Объем 2,25 п л. Уч.-изд л 2,15 14-VI-63 г.
Цена 22 коп.

СЕРИЯ «ПОЛУПРОВОДНИКИ»

Перечень выпусков

Вып 1. **В. П. Жузе.** Полупроводниковые материалы

Вып. 2. **Д Н. Наследов.** Соединения A^{III} и B^{V} и их использование

Вып 3. **Б. Т. Коломиец.** Стеклообразные полупроводники

Вып. 4. **А. В. Айрапетянц и Л. Д. Розенштейн.** Органические полупроводники.

Вып. 5. **Б. М. Гольцман.** Выращивание полупроводниковых монокристаллов

Вып. 6. **Ю. В. Илисавский.** Полупроводниковые тензометры

Вып. 7. **В. М. Тучкевич** Мощные полупроводниковые выпрямители

Вып. 8. **Л. С. Берман** Новые радиотехнические полупроводниковые приборы

Вып. 9. **Д. Н. Наследов.** Полупроводниковые приемники инфракрасного измерения

Вып. 10. **С. М Рывкин.** Полупроводниковые счетчики ядерных частиц

Вып. 11. **В. В. Пасынков, Ю. Т. Окунев.** Нелинейные полупроводниковые сопротивления (варисторы)

Вып. 12. **М. С. Соминский.** Полупроводниковая гелиотехника

Вып. 13. **В И. Стафеев.** Новые магниточувствительные приборы

Вып. 14. **А. Ф. Чудновский.** Применение полупроводников в сельском хозяйстве

Вып. 15. **И. И. Жилевич.** Электрография.

ЦЕНА 22 коп.

Ленинградское отделение Общества
по распространению политических и научных знаний РСФСР



В. В. ПАСЫНКОВ, Ю. Т. ОКУНЕВ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ (варисторы)

Выпуск 11